

**Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no *XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*, realizada no período de 20 a 25 de novembro de 2011, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do *XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*.

## Resumo

Ensaio realizados em laboratório e as observações em campo de misturas com asfalto-borracha têm demonstrado que estas misturas apresentam um desempenho claramente superior ao das misturas convencionais. Isto ocorre porque a borracha utilizada para modificar o asfalto incorpora neste, suas componentes relativas à flexibilidade e contribuindo ainda para reduzir o envelhecimento do asfalto. A interação entre o asfalto e a borracha depende em larga escala das características destes dois elementos, estando o desempenho do asfalto modificado com borracha dependente desta compatibilidade. A composição química e molecular do asfalto e da borracha faz com que determinados asfaltos tenham mais aptidão para se ligarem a determinadas borrachas, refletindo no comportamento dos asfaltos e consequentemente, no desempenho das misturas asfálticas. Este trabalho avaliou a influência da origem do asfalto nas características do asfalto-borracha e numa fase posterior no desempenho das misturas asfálticas. Para este estudo foram utilizados dois asfaltos de origem Portuguesa e um de origem Brasileira com os quais se produziram asfaltos modificados com uma borracha de origem Portuguesa e outra de origem Brasileira. Os resultados obtidos permitem concluir que a origem do asfalto e a origem da borracha influenciam consideravelmente o desempenho das misturas asfálticas.

## Abstract

Accomplish laboratory tests and field observations of asphalt rubber mixtures have been indicating that these mixtures clearly present superior performance than conventional mixtures. This happens because the rubber used to modify the asphalt incorporates in this, their relative components as the flexibility and still contributing to reduce the asphalt oxidation. The interaction between the asphalt and the rubber depends on the characteristics of these two elements and the compatibility between the rubber and the asphalt. The chemical and molecular composition of the asphalt and the rubber does that some asphalts have more ability to reaction with different rubbers, that results in the behavior of the asphalts and consequently, the asphalt mixtures. This paper evaluated the influence of the origin of the asphalt in the characteristics of the asphalt rubber that reflects in mechanical behavior of the asphalt mixtures. For this study two asphalts from Portuguese origin and one of Brazilian source were used to produced modified asphalt with two rubbers, one of Portuguese origin and another from Brazilian basis. The results allow to conclude that the origin of the asphalt and the origin of the rubber influence considerably of the performance of asphalt mixtures.

<sup>1</sup> Dra., Professora – Universidade Federal de Santa Catarina

<sup>2</sup> Dr., Professor – Universidade Federal de Santa Catarina

<sup>3</sup> PHD, Professor Catedrático – Universidade do Minho, Portugal

<sup>4</sup> PHD, Professor – Universidade do Minho, Portugal

## 1. Introdução

A incorporação de borracha de pneus usados no asfalto para produção de misturas asfálticas, além de melhorar o seu desempenho, contribui também para o destino final adequado de um resíduo sólido, o pneu usado. Numa mistura asfáltica, a borracha granulada de pneus usados pode ser incorporada por meio de dois processos: (i) seco, no qual a borracha desempenha o papel de um agregado fino e uma pequena interação com o ligante; (ii) úmido, onde a borracha atua como um agente modificador, conferindo novas propriedades ao asfalto convencional.

Os benefícios da utilização de misturas asfálticas com asfalto modificado com borracha, denominado asfalto-borracha, recorrendo ao processo úmido, evidenciados por diversos autores (Roberts et al., 1989; Hicks, 2002; Caltrans, 2003; Baker et al., 2003; Minhoto, 2007), são principalmente o aumento da resistência ao envelhecimento e oxidação, melhoria da resistência à fadiga e propagação de fendas e também maior resistência à deformação permanente.

A obtenção de borracha de pneus usados é realizada por meio da trituração à temperatura ambiente ou com temperaturas criogênicas, em que a trituração da borracha é feita a temperaturas negativas, inferiores a -120 °C. Os dois processos resultam na obtenção de borracha com diversas granulometrias e diferentes características.

Considerando que o tipo de asfalto e o tipo da borracha influenciam as propriedades do asfalto-borracha e o consequentemente desempenho da mistura asfáltica (Baker et al., 2003) neste trabalho foram produzidos e avaliados três asfaltos-borracha utilizando dois asfaltos convencionais de origem portuguesa e um de origem brasileira e dois tipos de borracha granulada de pneus usados (uma do tipo criogênica, de procedência portuguesa, e outra do tipo ambiente, de origem brasileira). Os asfaltos-borracha produzidos em laboratório foram avaliados por meio dos seguintes ensaios: (i) penetração; (ii) ponto de amolecimento – Método anel e bola; (iii) viscosidade aparente – viscosímetro Brookfield; (iv) resiliência; (v) envelhecimento RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*).

Após a produção dos asfaltos-borracha, foram produzidas misturas asfálticas utilizando a granulometria *gap graded* do *California Department of Transportation* (Caltrans), para as quais foi avaliado o desempenho por meio da resistência à fadiga, com o ensaio de flexão simples em 4 pontos, e à deformação permanente, com o ensaio de cisalhamento simples cíclico repetido a altura constante (RSST-CH).

## 2. Caracterização das Borrachas e dos Asfaltos Convencionais

De acordo com Hicks & Epps (2000), além da porcentagem de borracha incorporada, as principais características da borracha que afetam as propriedades do asfalto-borracha são as seguintes: (i) processo de obtenção; (ii) superfície específica; (iii) granulometria (iv); composição química; (v) contaminantes (água, fibras, minerais, aço). A norma ASTM D 6114 (1997) fornece as especificações para a borracha granulada empregada na modificação dos asfaltos convencionais.

Os dois principais processos para obtenção de borracha granulada de pneus utilizada na modificação dos asfaltos são o ambiente e o criogênico. O processo ambiente consiste na introdução dos pneus no granulador à temperatura ambiente, sendo a trituração dos pneus realizada por granuladores e moinhos (RRI, 2006). No caso do processo criogênico, são realizadas duas operações principais: (i) arrefecimento criogênico usando nitrogênio líquido para atingir e ultrapassar a temperatura de transição vítrea de todos os polímeros constituintes da borracha; e (ii) moagem criogênica com o emprego de moinhos de martelos especiais com muito alta energia de impacto, sob uma atmosfera inerte.

A análise granulométrica das borrachas ambiente e criogênica foi realizada de acordo com a norma ASTM C 136 (1996) adaptada com as recomendações constantes no *Greenbook* (2000), seção 203, na qual foi determinado que os teores de fibras e aço se encontram dentro das especificações. A superfície específica da borracha ambiente foi de 19,27 m<sup>2</sup>/kg e da borracha criogênica de 13,61 m<sup>2</sup>/kg.

A granulometria da borracha possui um efeito relevante nas propriedades do asfalto-borracha. As partículas grossas de borracha aumentam a viscosidade do asfalto-borracha, enquanto que as partículas finas (que passam na peneira nº 50) resultam em um menor tempo de digestão (Caltrans, 2005). O tempo de digestão é o termo utilizado para descrever o tempo necessário para promover a interação entre o asfalto e a borracha, quando misturados a elevadas temperaturas.

De acordo com os resultados obtidos, a borracha ambiente apresentou menores tamanhos granulares e uma superfície específica mais elevada que a borracha criogênica.

Para produção dos asfaltos-borracha foram utilizados três asfaltos convencionais, sendo dois portugueses: PEN 35/50 (pt1) e PEN 50/70 (pt2) e o asfalto brasileiro CAP-50/70 (br1), todos classificados por penetração. Para todos os asfaltos convencionais foram realizados ensaios de caracterização e os resultados são apresentados na Tabela 1.

Os resultados obtidos mostraram que o asfalto pt1 é mais rígido que os outros, sendo que os asfaltos pt2 e br1 apresentaram características semelhantes. Os três asfaltos encontram-se dentro das especificações vigentes.

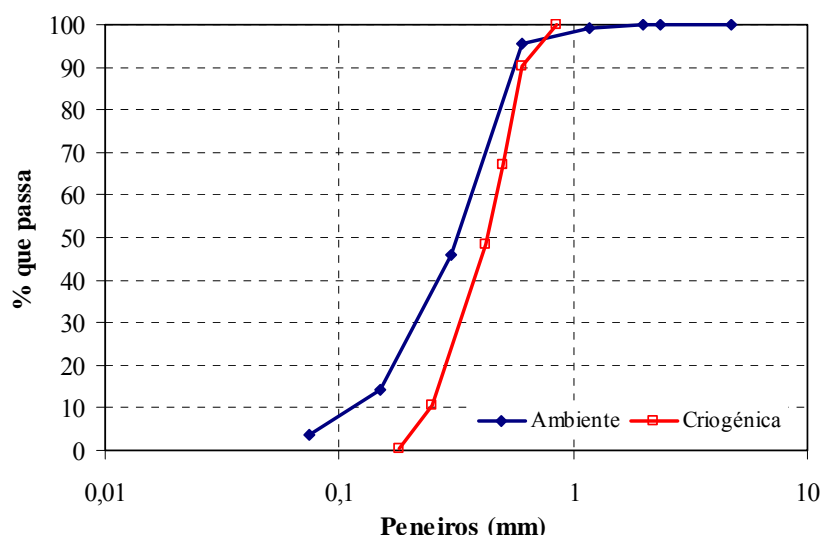


Figura 1. Curvas granulométricas das borrachas

Tabela 1. Ensaio de caracterização dos asfaltos convencionais

Ensaio	Norma	pt <sub>1</sub>	pt <sub>2</sub>	br <sub>1</sub>
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	33	53	52
Ponto de amolecimento* (°C)	ASTM D 36	53	48	52
Viscosidade aparente** (cP) a 175°C	ASTM D 2196	175	112	127
RTFOT 163°C, 85 minutos	ASTM D 2872			
Variação em massa (% de massa) máx		0,2	0,2	0,3
Aumento do PA (°C) máx		0,5	9,8	4,3
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		27,7	25,7	22,3
Penetração retida (%) mín		84	49	43

\*Método anel e bola; \*\* 175 °C, Viscosímetro Brookfield, *spindle* 27, 20 rpm.

## 2.1. Asfaltos-borracha

No sistema úmido de produção do asfalto-borracha, quando a borracha é adicionada ao asfalto e misturada, sob agitação e a elevadas temperaturas, este asfalto modifica-se e passa a ter diferentes propriedades em relação ao asfalto base original. A modificação deve-se a mudanças na composição do asfalto que ocorrem durante a interação entre este e a borracha.

A percentagem de borracha, a granulometria das partículas de borracha, o tempo e a temperatura de digestão são características que influenciam as propriedades físicas e reológicas como a viscosidade, o ponto de amolecimento e a recuperação elástica do asfalto modificado e, consequentemente, o desempenho da mistura asfáltica em serviço.

Neste estudo, os asfaltos-borracha foram produzidos em laboratório por meio do sistema úmido com as seguintes características: (i) percentagem de borracha: 17%; (ii) tempo de digestão: 90 minutos; (iii) temperatura de digestão: 180 °C. A adição da borracha ao asfalto foi realizada por agitação com a utilização de um agitador mecânico.

Foram produzidos em laboratório os seguintes asfaltos-borracha: (i) PT1: asfalto pt1 (PEN 35/50) e borracha criogénica (materiais portugueses); (ii) PT2: asfalto pt2 (PEN 50/70) e borracha criogénica (materiais portugueses); (iii) BR1: asfalto br1 (CAP-50/70) e borracha ambiente (materiais brasileiros).

A norma ASTM D 6114 (1997) especifica as características físicas para os asfaltos modificados com borracha. Os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização são apresentados na Tabela 2 e mostram que os ligantes produzidos encontram-se dentro dos limites especificados.

De acordo com a Tabela 2 foi possível observar que a borracha ambiente (menor granulometria e maior superfície específica), resultou em um asfalto-borracha (BR1) com viscosidade mais elevada do que os asfaltos-borracha (PT1 e PT2) produzidos com a borracha criogénica (partículas de tamanhos maiores e menor superfície específica).

Dantas Neto (2004) ressalta que a diminuição da viscosidade ocorrida com a utilização de uma borracha com menor superfície específica pode ser atribuída à diminuição da área de contato entre o asfalto e a borracha, tendo como consequência a diminuição das possíveis reacções entre estes dois materiais.

Para todos os asfaltos-borracha verificou-se que a incorporação da borracha, independente do tipo, diminuiu a penetração e aumentou o ponto de amolecimento em relação aos asfaltos convencionais (Tabela 1). Em relação à resiliência, o asfalto-borracha PT1 apresentou uma tendência de melhor recuperação elástica em relação aos outros dois. O mesmo se verificou em relação ao ponto de amolecimento, sendo que o asfalto-borracha PT1 tenderá a ter uma maior resistência à deformação permanente.

Após o ensaio de envelhecimento, os asfaltos-borracha apresentaram um aumento no ponto de amolecimento e uma redução da penetração. Em todos os casos houve perda de massa, factor este atribuído à perda de voláteis durante o processo de envelhecimento.

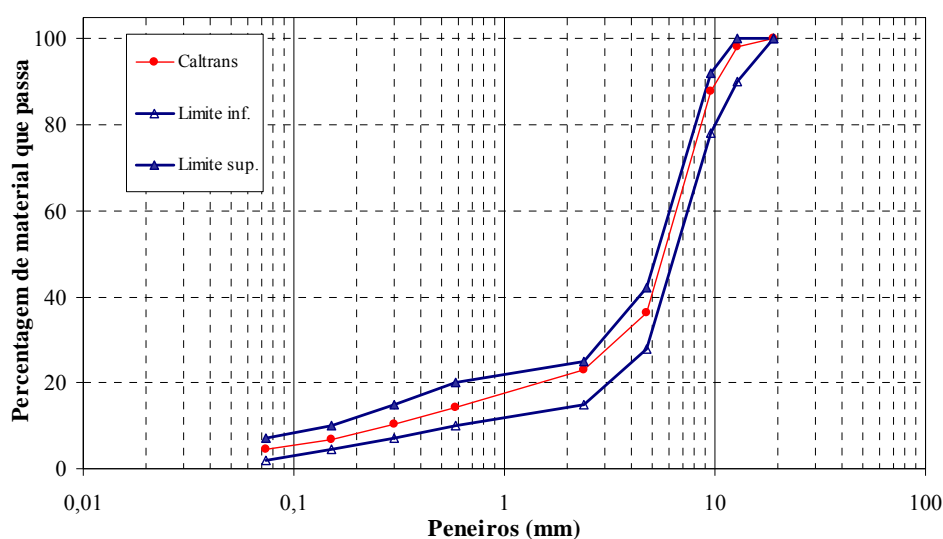
Tabela 2. Ensaios de caracterização dos asfaltos-borracha

Ensaio	Norma	Especificação	PT1	PT2	BR1
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	17	27	26
Ponto de amolecimento* (°C)	ASTM D 36	54,4 mín.	73	62	65
Viscosidade aparente** (cP) a 175°C	ASTM D 2196	1500 mín.	2246	1821	2829
RTFOT 163°C, 85 minutos	ASTM D 2872	20	49	26	40
Resiliência (%)	ASTM D 5329				
Varição em massa (% de massa) máx			0,9	0,1	0,3
Aumento do PA (°C) máx			11,2	4,7	8,5
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)			15,5	31,8	18,8
Penetração retida (%) mín			92,2	100	71,1

\*Método anel e bola; \*\* 175 °C, Viscosímetro Brookfield, *spindle* 27, 20 rpm.

### 3. Produção das Misturas Asfálticas com Asfalto-Borracha

A granulometria *gap graded* adoptada para produção das misturas asfálticas com asfalto-borracha foi a especificada pelo Caltrans, tipo ARHM-GG *mix* (*Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*), de acordo com o *Standard Special Provisions*, SSP 39-400 (Caltrans, 2003). A curva granulométrica tipo *gap graded* não apresenta uma granulometria contínua para todos os tamanhos de agregados, normalmente faltando uma ou duas frações de agregados finos. Esta granulometria é utilizada para promover o contato de grão a grão na mistura asfáltica, promovendo a estabilidade, a flexibilidade e a durabilidade (Hicks, 2002; Caltrans, 2003). A Figura 2 apresenta a curva granulométrica estudada e a faixa granulométrica especificada pelo Caltrans.

Figura 2. Curva e faixa granulométrica Caltrans tipo ARHM-GG *mix*

A determinação do teor ótimo de asfalto e dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas foi realizada por meio da metodologia Marshall, de acordo com a norma ASTM D 1559 e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. Foram utilizadas as seguintes nomenclaturas para as misturas asfálticas: (i) MPT1: mistura *gap graded* com

asfalto-borracha PT1; (ii) MPT2: mistura *gap graded* com asfalto-borracha PT2; (iii) MBR1: mistura *gap graded* com asfalto-borracha BR1.

Os agregados utilizados são de origem granítica provenientes de uma pedreira de Guimarães (Portugal). Os agregados foram avaliados com ensaios de caracterização correntes e os resultados mostraram que podem ser utilizados na produção de misturas asfálticas. Além dos agregados péticos, também foi utilizado um filer calcário de modo a satisfazer as exigências granulométricas.

Os agregados minerais utilizados possuem a seguinte designação granulométrica: (i) brita 6/12 – tamanho nominal 6 a 12 mm; (ii) brita 4/10 – tamanho nominal 4 a 10 mm; (iii) pó 0/4 (pó de pedra) – tamanho nominal inferior a 4 mm.

Tabela 3. Teor ótimo e volume de vazios

Mistura	Teor ótimo de asfalto (%)	Volume de vazios (%)
MPT1	8,0 (7,0 a 9,0)	6,0 (4,0 a 6,0)
MPT2	8,0 (7,0 a 9,0)	6,0 (4,0 a 6,0)
MBR1	8,0 (7,0 a 9,0)	6,0 (4,0 a 6,0)

Após a formulação, as misturas foram produzidas e moldadas em lajes (dimensões 75 cm de comprimento, 49 cm de largura e 8 cm de espessura) para a obtenção de corpos de prova para os ensaios de desempenho. Para cada tipo de mistura asfáltica foram moldadas duas lajes, sendo uma para ensaios de módulo dinâmico e de resistência à fadiga e outra, para ensaio de deformação permanente.

Para os ensaios de fadiga e de módulo dinâmico, a laje foi serrada para obtenção de 9 corpos de prova prismáticos com as seguintes dimensões: 38,0 x 5,0 x 6,3 cm. Para o ensaio de deformação permanente, 8 cilindros com 15 cm de diâmetro e 5 cm de altura foram extraídos através do emprego de uma sonda rotativa.

#### 4. Módulo Dinâmico e Resistência à Fadiga

Para a realização dos ensaios de módulo dinâmico e de resistência à fadiga foi utilizado um equipamento servo-hidráulico constituído por uma estrutura de carga, um grupo hidráulico e uma câmara climática, dentro da qual se encontra um dispositivo que permite a realização de ensaios de flexão em 4 pontos.

O ensaio do módulo dinâmico das misturas foi conduzido de acordo com a norma AASHTO TP8-94 utilizando o equipamento de flexão em 4 pontos. Nos corpos de prova prismáticos foi aplicado um carregamento sinusoidal repetido a uma deformação máxima específica de tração (extensão) na sua base de  $100 \times 10^{-6}$ . O ensaio foi conduzido a 20°C e foram aplicadas as seguintes frequências: 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz. Os resultados obtidos, ângulo de fase e módulo dinâmico, que representam a média de 9 corpos de prova para todas as frequências aplicadas, são apresentados na Tabela 4. A Figura 3 apresenta o módulo dinâmico em função das frequências aplicadas.

Tabela 4. Módulo de deformabilidade e ângulo de fase das misturas

Frequência (Hz)	MPT1		MPT2		MBR1	
	Módulo Dinâmico (MPa)	Ângulo de Fase (°)	Módulo Dinâmico (MPa)	Ângulo de Fase (°)	Módulo Dinâmico (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	5192	16,8	3357	28,0	4593	19,6
5	4537	19,7	2687	32,1	3926	23,2
2	3652	23,4	1890	37,7	3041	28,2
1	3034	26,2	1409	41,6	2434	32,0
0,5	2468	28,7	1018	44,6	1892	35,8
0,2	1840	32,4	635	47,7	1306	41,2
0,1	1438	34,9	453	50,6	950	43,6

Para todas as frequências, a mistura MPT1, que possui como asfalto convencional base o tipo PEN 35/50 e, portanto, mais rígido, apresentou um módulo dinâmico mais elevado que as outras misturas. Comparando-se as misturas MPT2 e MBR1, que foram produzidas com um asfalto convencional do mesmo tipo (PEN 50/70), mas de origens

diferentes, observa-se que a mistura MBR1 possui os módulos superiores. Quanto ao ângulo de fase, indicador das propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, os resultados mostraram que a mistura MPT2 apresentou os valores mais elevados.

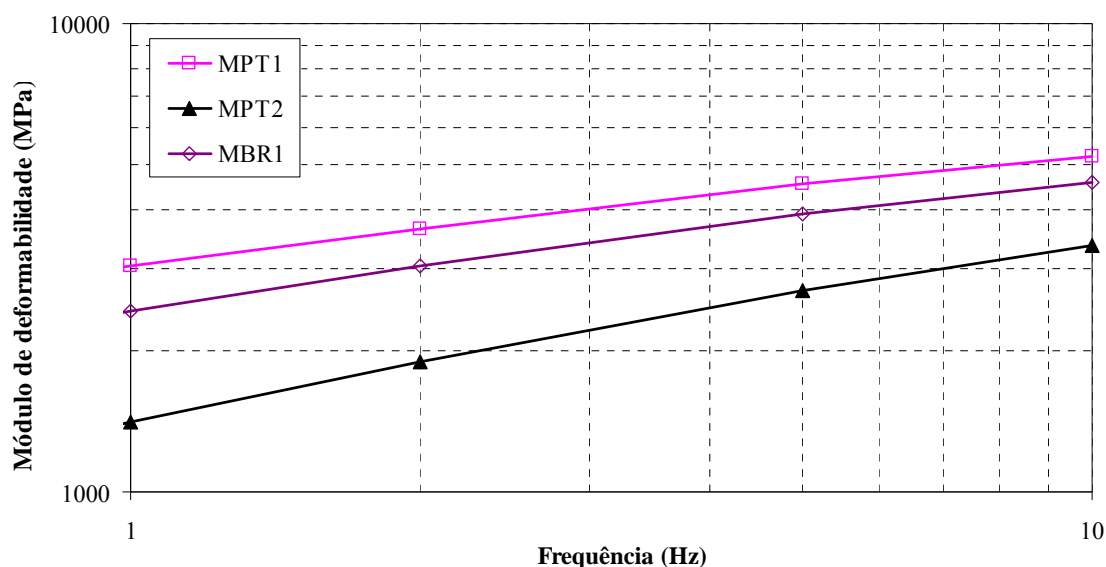


Figura 3. Módulo dinâmico das misturas asfálticas

O ensaio utilizado para avaliação da resistência à fadiga foi o de flexão em 4 pontos sobre corpos de prova (vigas) prismáticos, conforme preconiza a norma AASHTO TP8-94 (*Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*). Foram realizadas 3 repetições para cada um dos níveis de deformações específicas selecionados ( $200, 400$  e  $800 \times 10^{-6}$ ). Os ensaios foram conduzidos a deformação controlada a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  e à frequência de  $10\text{ Hz}$ .

A determinação das leis de fadiga (ou curvas de fadiga) corresponde a um ajuste de uma função de potência da lei de fadiga (Equação 1) aos resultados obtidos nos ensaios. Os resultados são expressos em termos do número médio de ciclos que produz uma redução de 50% na rigidez da mistura (critério de ruptura do ensaio).

$$N = a \times \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^b \quad (1)$$

onde:  $N$  = número de aplicações de carga até à ruptura;  
 $\varepsilon$  = deformação específica de tração (extensão);  
 $a, b$  = constantes determinadas experimentalmente.

Os parâmetros obtidos para as misturas são apresentados na Tabela 5, na qual se verifica um bom ajuste para todas as misturas. Com as leis de fadiga é possível, por extrapolação, determinar se o  $N_{100}$  (número de ciclos para uma deformação específica de  $100 \times 10^{-6}$  que leva a mistura a ruptura por fadiga) para cada mistura. Na Figura 4 apresentam-se as curvas de fadiga das misturas estudadas, onde cada ponto do gráfico corresponde à média das três repetições de cada ensaio realizado.

Tabela 5. Parâmetros experimentais obtidos para as leis de fadiga

Parâmetros	MPT1	MPT2	MBR1
a	$9,81 \times 10^{18}$	$2,27 \times 10^{17}$	$2,81 \times 10^{15}$
b	5,138	4,707	4,028
$R^2$	0,98	0,97	0,98
$N_{100}$	$5,20 \times 10^8$	$8,75 \times 10^7$	$2,47 \times 10^7$

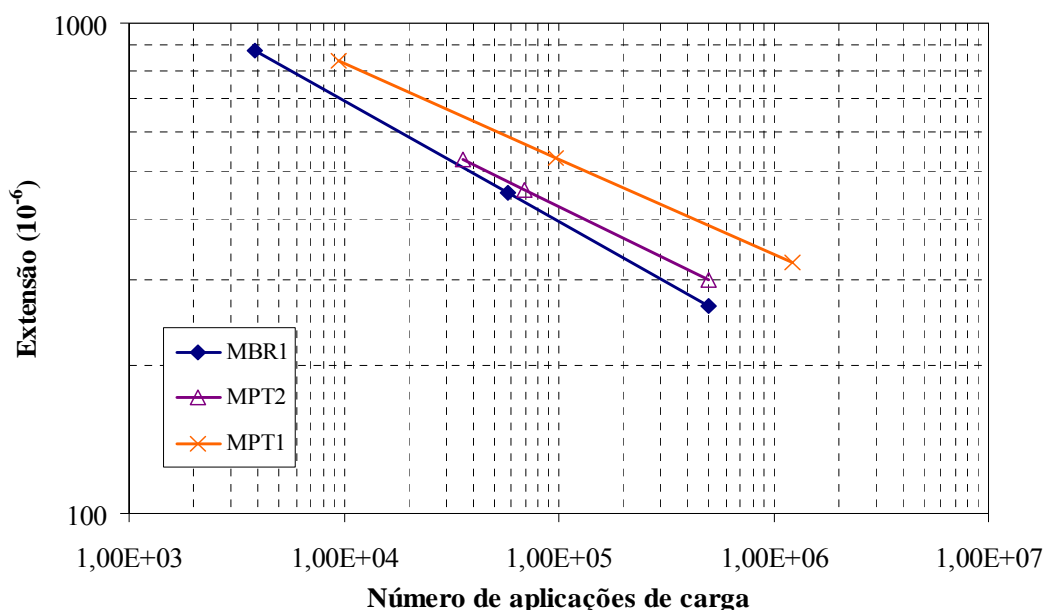


Figura 4. Curvas de fadiga das misturas asfálticas

## 5. Deformação permanente

A avaliação da resistência à deformação permanente foi realizada através do ensaio de cisalhamento simples repetido à altura constante (RSST-CH) de acordo com o preconizado pela norma AASHTO TP7-94. No ensaio aplica-se, de forma repetitiva, um esforço cisalhante de 70 kPa durante 0,6 s, seguido de um período de repouso de 0,1 s. Os ensaios foram realizados à temperatura de 60 °C. A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de cisalhamento, expresso em ESALs (eixos de 80 kN) para uma trilha-de-roda de 12,7 mm de profundidade nas misturas. Os resultados representam a média de 8 corpos de prova.

A análise dos resultados da resistência à deformação permanente (Figura 5) mostrou que a mistura MPT1 apresentou um desempenho muito superior em relação às outras duas. O emprego de um asfalto base mais rígido teve uma influência significativa no desempenho da mistura em relação à deformação permanente. Relativamente às misturas MPT2 e MBR1, que utilizaram o mesmo tipo de asfalto base, os resultados mostraram que a mistura MBR1 apresentou uma maior resistência à deformação permanente enquanto que a mistura MPT2 obteve um fraco desempenho.

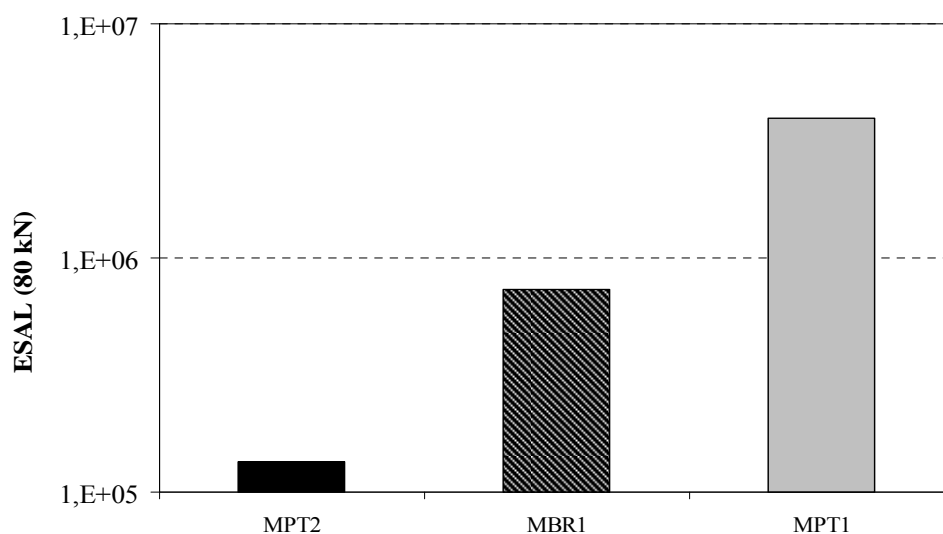


Figura 5. Deformação permanente das misturas

## 6. Conclusões

Foram produzidos asfaltos modificados com borracha de pneus usados com o objetivo de avaliar a contribuição da origem dos materiais no desempenho das misturas asfálticas. Os ensaios de desempenho realizados foram de resistência à fadiga e resistência à deformação permanente.

Os asfaltos-borracha foram produzidos em laboratório por meio do processo úmido, utilizando materiais portugueses (asfaltos convencionais PEN 50/70 e PEN 35/50 e borracha criogênica) e materiais brasileiros (asfalto base CAP-50/70 e borracha ambiente). A porcentagem de borracha, o tempo de digestão e a temperatura de digestão foram as mesmas utilizadas para todos os asfaltos-borracha.

Neste estudo foi observado que as propriedades físicas do asfalto-borracha dependeram das propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados, assim, para se obter as propriedades desejadas, devem ser identificados os materiais e condições de interação apropriados.

Os asfaltos-borracha foram avaliados por meio de ensaios de caracterização, nos quais, pode observar-se que as propriedades obtidas pelo asfalto-borracha PT1 revelaram uma tendência de melhor comportamento para produção de misturas asfálticas.

Além do aumento da viscosidade, os asfaltos-borracha apresentaram um ponto de amolecimento mais elevado do que os asfaltos convencionais que lhes deram origem. Para todos os asfaltos-borracha produzidos foi observado que a modificação do asfalto convencional aumentou a elasticidade, fato demonstrado pelos resultados dos ensaios de resiliência.

Relativamente aos ensaios de desempenho, tanto em relação à resistência à fadiga quanto à resistência à deformação permanente, a mistura produzida com o asfalto-borracha PT1 (borracha criogênica) apresentou um desempenho superior. O asfalto base convencional mais duro melhorou o desempenho mecânico da mistura asfáltica.

As misturas MBR1 e MPT2 apresentaram um desempenho semelhante quanto à resistência à fadiga. Em relação à deformação permanente, a mistura MPT2 não foi satisfatória.

## 7. Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao Programa ALβAN (Programa de Bolsas de Alto Nível da União Européia para a América Latina), pela bolsa nº E04D040507BR durante os trabalhos em Portugal e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa no Brasil. Agradece-se também à empresa Greca Asfaltos pela participação na pesquisa.

## 8. Referências

- BAKER, T.E.; ALLEN, T.M.; JENKINS, D.V.; MOONEY, T.M.; PIERCE, L.M.; CHRISTIE, R.A.; WESTON, J.T. Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department of Transportation. Olympia, Washington, USA, 2003.
- CALTRANS. Asphalt Rubber Usage Guide. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA, 2003.
- CALTRANS. Use of Scrap Tire Rubber. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA, 2005.
- DANTAS NETO, S.A.. Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, Brasil, 2004.
- GREENBOOK. Standard Specifications for Public Works Construction, 2000 Edition. Public Works Standards, Inc. Anaheim, California, USA, 2000.
- HICKS, R.G. e EPPS, J.A. Quality Control for Asphalt Rubber Binders and Mixes. Rubber Pavement Association. Tempe, Arizona, USA, 2000..
- HICKS, R.G. Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – Design Guidelines. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRATC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA, 2002.
- MINHOTO, M.J.C. Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 2007.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; DUNNING, R.L. Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology nº 89-3. Auburn, Alabama, USA, 1989.
- RRI, 2006. Rubber Recycling. Recycling Research Institute Scrap Tire News. Leesburg, Virginia, USA.